

Τα μηχανικά Ρολόγια

Από την υδραυλίδα στα ατομικά χρονόμετρα

Μάνος Δανέζης-Στράτος Θεοδοσίου
Επίκουροι Καθηγητές Αστροφυσικής
Πανεπιστημίου Αθηνών

Τα υδραυλικά χρονόμετρα

Οι απλές υδάτινες κλεψύδρες σύντομα εξελίχθηκαν σε πολύπλοκα υδραυλικά όργανα, με σιφώνια και οδοντωτούς τροχούς. Εφευρέτης μιας βελτιωμένης κλεψύδρας, της *υδραυλίδας*, μπορεί να θεωρηθεί ο περίφημος μηχανικός της αρχαιότητας *Κτησίβιος ο Αλεξανδρέας*. Το υδραυλικό αυτό όργανο αποτελείτο από ένα μεταλλικό δοχείο σε σχήμα ανεστραμμένου κώνου, που είχε μια μικρή οπή στην κορυφή, από την οποία έσταζε το νερό που μαζευόταν σε ένα κυλινδρικό δοχείο. Η ροή του νερού είχε ρυθμιστεί, ώστε να είναι ισοταχής και να μπορούν να υπολογίζονται οι ώρες ανάλογα με τον όγκο του ρέοντος νερού. Στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού που γέμιζε το κυλινδρικό δοχείο επέπλεε, σύμφωνα με την περιγραφή του αρχιτέκτονα *Βιτρούβιου* (30 π.Χ.), ένα κομμάτι φελλού ή ένας ανεστραμμένος πλωτήρας. Πάνω στον πλωτήρα υπήρχε ένας κανόνας με οδοντωτούς τροχούς, οι οποίοι στρέφονταν πολύ αργά, καθώς οι οι σταγόνες του νερού χτυπούσαν πάνω τους. Με τον τρόπο αυτό είχε επινοηθεί η αρχή του μηχανικού ρολογιού. Σύμφωνα με την περιγραφή του *Γαλινού* (131-201 μ.Χ.), το υδραυλικό αυτό ρολόι κατασκευαζόταν από διαφανές υλικό, ώστε να φαίνεται η στάθμη του νερού, η οποία υπεδείκνυε τον ακριβή χρόνο μέσω μιας αριθμημένης κλίμακας.

Από τα γνωστότερα υδραυλικά χρονόμετρα της αρχαιότητας ήταν το *Μνημείο του Ανδρόνικου του Κυρρήστου* (50 π.Χ.), ή, όπως λέγεται σήμερα *Πύργος των Ανέμων*, το οποίο βρίσκεται στην Αρχαία Ρωμαϊκή Αγορά της Αθήνας. Κατά πάσαν πιθανότητα το υδροχρονόμετρο ετροφοδοτείτο με νερό από την περίφημη πηγή της Ακρόπολης.

Ο μηχανισμός ενός υδραυλικού χρονομέτρου

Εδώ να μπει το σχήμα της σελίδας 122, αφού ξαναγίνει αν είναι δυνατόν εγχρωμο

Το νερό μέσω ενός σωλήνα γέμιζε το κυλινδρικό δοχείο (1), που έφερε ένα μικρό υπερχειλιστήρα προκειμένου να διατηρείται στο ίδιο επίπεδο η στάθμη του νερού. Με τον τρόπο αυτό παρέμενε σταθερή η πίεση και η ταχύτητα εκροής του νερού από τη βάση του κυλίνδρου. Η συνεχής ροή του νερού γέμιζε σιγά - σιγά το κυλινδρικό δοχείο (2), υψώνοντας ταυτόχρονα έναν πλωτήρα, πάνω στον οποίο υπήρχε ένα αγγελάκι που κρατούσε ένα ραβδί στο δεξί χέρι. Το ραβδάκι αυτό έδειχνε την ώρα πάνω στις γενέτερες του βαθμονομημένου κυλινδρικού τυμπάνου (3).

Το τύμπανο ήταν βαθμονομημένο σύμφωνα με το παλιό αιγυπτιακό σύστημα των μεταβλητών ωρών, ανάλογα με τις εποχές. Οι ωρικές γραμμές πάνω στο τύμπανο στένευαν από γενέτετρα σε γενέτετρα, έτσι ώστε, όσο πλησίαζε ο χειμώνας η απόσταση μεταξύ τους να γίνεται μικρότερη. Το τύμπανο κάθε ημέρα στρεφόταν, όταν το νερό του δευτέρου κυλίνδρου έφτανε τον αγκώνα του σιφονίου, που με τη σειρά του άδειαζε το νερό πάνω σε ένα τροχό με πτερύγια (4), ο οποίος έστρεφε ένα σύστημα οδοντωτών τροχών (5) που μετέφεραν την κίνηση στο βαθμονομημένο τύμπανο (3).

Οι πρόδρομοι των μηχανικών ρολογιών

Η ιστορία των μηχανικών ρολογιών, αν και αυτά εμφανίστηκαν στη Δυτική Ευρώπη τον 12^ο ή 13^ο αιώνα, αρχίζει πολύ νωρίτερα. Μια κλειστή και συντηρητική κοινωνία της Άπω Ανατολής, η κινεζική, είχε εφεύρει το μηχανικό ρολόι τον 1^ο ή 2^ο μ.Χ. αιώνα.

Την περίοδο αυτή οι Κινέζοι αστρονόμοι κατασκεύασαν ένα μεγάλο ορειχάλκινο όργανο για τον προσδιορισμό των εκλειπτικών συντεταγμένων των άστρων.

Τον 5^ο μ.Χ. αιώνα οι Κινέζοι αστρονόμοι κατασκευάζουν μια μεγάλη ουράνια σφαίρα και συνδέουν τους ρυθμούς του χρόνου με τις μεταβολές των θέσεων των ουρανίων σωμάτων. Ο αστρονόμος *Υ- Γιάγκ*, τον 8^ο μ.Χ. αιώνα, κατασκεύασε μια μεγάλη χάλκινη ουράνια σφαίρα, αληθινό αριστούργημα τέχνης. Η σφαίρα αυτή ήταν ουσιαστικά ένα υδραυλικό χρονόμετρο, του οποίου οι τροχοί κινούνταν με νερό και έδειχνε τις κινήσεις του Ήλιου, της Σελήνης, των πέντε γνωστών τότε πλανητών, τις συνόδους των πλανητών και τη διάρκεια της μέρας και της νύχτας με εκπληκτική ακρίβεια.

Οι κινεζικές ουράνιες σφαίρες, οι οποίες αποτελούνταν αρχικά από δύο δακτυλίους, τον ένα μέσα στον άλλο, ονομάζονταν *κρικωτές σφαίρες* και ήταν οι πρόδρομοι των σύγχρονων μηχανικών ρολογιών. Τα υδροχρονόμετρα αυτά παρουσίαζαν, λόγω των τριβών, κάποια διαφορά ως προς την πραγματική ώρα, γεγονός που γνώριζαν οι κατασκευαστές τους, έτσι, κατά έξυπνο τρόπο, έκαναν τις διορθώσεις σε περιόδους συννεφιάς, τότε δηλαδή που δεν ήταν δυνατόν κανένας να παρατηρήσει τη θέση των ουρανίων σωμάτων.

Σήμερα είναι γνωστό ότι οι Κινέζοι αστρονόμοι επινόησαν τον πρώτο εκκρουστήρα, την καρδιά δηλαδή ενός μηχανικού ρολογιού, γύρω στο 700 μ.Χ., επτά αιώνες περίπου πριν το κατορθώσει ο Δυτικός πολιτισμός.

Τα επιτεύγματα και οι ανακαλύψεις των Κινέζων σοφών και αστρονόμων της αρχαιότητας μελετήθηκαν από τον καθηγητή *Τζόζεφ Νήνταμ (Joseph Needham)* του Πανεπιστημίου του Καίμπριτζ. Στα μέσα της δεκαετίας του '50, και ενώ μελετούσε με τον καθηγητή στο Γέιλ *Ντέρεκ ντε Σόλλα Πράις (Derek de Solla Price)* αρχαίες κινεζικές ιστορικές πηγές, ανέσυραν από τη λήθη τον πραγματικό πρόγονο των ευρωπαϊκών μηχανικών ρολογιών, ένα υδραυλικό ρολόι που χρησιμοποιούσε σύστημα διαφυγής. Το περίφημο αυτό όργανο κατασκευάστηκε το 1088 μ.Χ. από τον Κινέζο μανδαρίνο *Σου Σουνγκ (Su Sung 1020-1101 μ.Χ.)*. Παρ' όλα αυτά όπως απέδειξαν οι έρευνες του *Τζόζεφ Νήνταμ* το πρώτο ρολόι με διαφυγή είχε κατασκευαστεί στην Κίνα τουλάχιστον 300 χρόνια πριν το ρολόι του Σου Σουνγκ.

Το ρολόι της Φεζ

Η πόλη *Φεζ*, θρησκευτικό κέντρο του Μαρόκου, βρίσκεται στους πρόποδες του *Μικρού Άτλαντα*. Έχει πολυάριθμα ιεροσπουδαστήρια στεγασμένα σε μεγαλοπρεπή κτίρια αραβικής τέχνης. Ένα από αυτά είναι το *Μπου-Ανανίγια*, στο οποίο ήταν τοποθετημένο το περίφημο *ρολόι της Φεζ*. Το καταπληκτικό αυτό υδραυλικό ρολόι κατασκευάστηκε το 1357μ. Χ. από έναν άγνωστο τεχνίτη του Τζεμχέν, υπό την καθοδήγηση Αράβων αστρονόμων.

Σήμερα σώζεται μόνο η πρόσοψη του μεγάλου αυτού κτιρίου, μήκους 12 μέτρων. Ο ωρολογιακός μηχανισμός του, φυσικά έχει καταστραφεί, αλλά από τα υπολείμματά του οι επιστήμονες κατόρθωσαν να ανακαλύψουν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούσε.

Σύμφωνα με τον καθηγητή *Ντέρεκ ντε Σόλλα Πράις* (1962), ο χρονομετρικός μηχανισμός του ρολογιού της Φεζ έπιανε μια ολόκληρη αίθουσα. Σ' αυτή την αίθουσα υπήρχε ένα υδραυλικό ρολόι που έβαζε σε κίνηση έναν χρονομετρικό μηχανισμό. Ο οποίος έριχνε ένα λιθαράκι, μέσω ξυλίνων εσοχών που υπήρχαν στη στέγη του κτιρίου, πάνω σε ένα τύμπανο. Κάθε μία ώρα ένα λιθαράκι έπεφτε πάνω στο τύμπανο, που βρισκόταν 6 μέτρα χαμηλότερα, και ο ήχος που ακουγόταν έδειχνε την ώρα. Ταυτόχρονα ο ίδιος ωρολογιακός μηχανισμός άνοιγε μία από τις 12 πόρτες, που αντιπροσώπευαν τις ώρες, και βρισκόνταν στο κέντρο του κτιρίου.

Ο μηχανισμός των Αντικυθήρων

Ο πατέρας όλων των μηχανικών ρολογιών, όπως πιστεύουμε σήμερα, είναι ο ελληνικός **μηχανισμός (αστρολάβος) των Αντικυθήρων**. Αυτόν τον διάσημο πια λογιστικό δίσκο ανέσυρε ένας σφουγγαράς από βυθισμένο πλοίο στη θαλάσσια περιοχή των Αντικυθήρων (1900). Υπολογίζεται ότι βρισκόταν εκεί 2.000 χρόνια και θεωρείται ότι ήταν ένα από τα λάφυρα που έπλεαν προς τη Ρώμη μετά τη λεηλασία της Αθήνας από τα στρατεύματα του **Σύλλα** (86 π.Χ.). Ο καθηγητής στο Γέιλ **Ντέρεκ ντε Σόλλα Πράις**, το 1954, μελέτησε με ειδικές τεχνικές το όργανο αυτό και το κατέταξε στις ημερολογιακές υπολογιστικές συσκευές. Υποστήριξε ακόμα ότι χρησιμοποιείται προκειμένου να υπολογίζονται οι θέσεις του Ήλιου, της Σελήνης και των πλανητών στον ζωδιακό κύκλο. Ο καθηγητής Πράις επιχείρησε να ανακατασκευάσει τον μηχανισμό του Αστρολάβου των Αντικυθήρων

Τα μηχανικά ρολόγια στην Ευρώπη

Στη Δυτική Ευρώπη μετά το 9^ο μ.Χ. αιώνα ουσιαστικά μόνο η Εκκλησία ενδιαφερόταν για την ακριβή μέτρηση του χρόνου. Έτσι δεν είναι περίεργο το γεγονός ότι η κατασκευή του πρώτου μηχανικού ρολογιού στη Δύση, περίπου το 996 μ.Χ. αποδίδεται στον **Γερβέρτο του Ωριγιάκ**, τον μετέπειτα **πάπα Σίλβεστρο Β'** (999-1003 μ.Χ), αφού κατά την παράδοση ήταν εκείνος που εφεύρε τη διαφυγή και ανακάλυψε το πρώτο μηχανικό ρολόι. Τους επόμενους αιώνες κατασκευάστηκαν μεγάλα μηχανικά ρολόγια που τοποθετήθηκαν στα καμπαναριά των εκκλησιών και στα δημόσια κτίρια. Στις αρχές του 14^{ου} αιώνα οι άνθρωποι εγκατέλειψαν το παλαιό σύστημα των άνισων ωρών, για χάρη του νεότερου συστήματος των ισόχρονων ωρών. Ο **Βαρθολομαίος ο Αγγλικός**, φραγκισκανός μοναχός και θεολόγος, έγραψε τον 13^ο αιώνα το περίφημο έργο του **De proprietate rerum** (Για τις ιδιότητες των πραγμάτων). Σ' αυτό σύμφωνα με τη συνήθεια της εποχής, διαιρεί την ημέρα σε 24 ώρες ίσης διάρκειας. Κάθε ώρα διαιρείται σε 4 σημεία ή 40 στιγμές. Κάθε στιγμή περιλαμβάνει 12 συγγίες και κάθε συγγία 47 άτομα. Βέβαια, αυτή η διαίρεση της ώρας δεν επικράτησε, αφού ήδη ήταν αποδεκτό το εξηκονταδικό σύστημα, με την ώρα να περιέχει 60 πρώτα λεπτά και κάθε πρώτο λεπτό 60 δευτερόλεπτα.

Η ιστορία του εκκρεμούς

Απ' ότι είναι γνωστό μέχρι σήμερα, το εκκρεμές χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά, ως χρονόμετρο περίπου το 1000 μ.Χ. από τον Αιγύπτιο αστρονόμο **Ιμπν Γιουνίς** (Ibn-Yunus, 979-1008 μ.Χ.). Όπως είναι φανερό η ανακάλυψη του Ιμπν-Γιουνίς έγινε 600 περίπου χρόνια πριν από το **Γαλιλαίο** (1564-1642), που μελέτησε τους νόμους του εκκρεμούς, και σχεδόν 657 χρόνια πριν ο **Χούυγκενς** (1629-1695) το χρησιμοποιήσει για την κατασκευή ωρολογιακών μηχανισμών.

Το εκκρεμές υπήρξε για πολλούς αιώνες ο ακριβέστερος ρυθμιστής των χρονομέτρων, και αυτό γιατί ο χρόνος που χρειάζεται για να κάνει μια πλήρη, όπως λέμε, αιώρηση παραμένει ανεξάρτητος από το πλάτος της.

Το έτος 1637 ο Γαλιλαίος επινόησε ένα χειροκίνητο μηχανισμό με τροχούς. Το 1641, ένα έτος πριν το θάνατό του, συνέλαβε επακριβώς τη χρήση του εκκρεμούς ως ωρολογιακού μηχανισμού.

Το 1657 ο Ολλανδός φυσικός και αστρονόμος *Χούυγκενς (Christian Huygens)* κατασκεύασε τα σταθερά ρολόγια ακριβείας, εφαρμόζοντας τη μεγαλοφυή ιδέα του να συνδυάσει το ελεύθερο εκκρεμές με το εκκρουστικό όργανο. Στη συνέχεια συμπλήρωσε την εφεύρεσή του (1673) με το κυκλοειδές εκκρεμές και το σύστημα κανονισμού της ισότητας των χρόνων. Ο μηχανισμός αυτός ήταν πολύ πιο ακριβής από οποιοδήποτε ρολόι της εποχής, όμως δεν πολυχρησιμοποιήθηκε, διότι την ίδια περίοδο εφευρέθηκαν τα εκκρουστικά όργανα με άγκυρα διαφυγής, που ήδη από το 1666 είχε επινοήσει ο Άγγλος φυσικός *Ρόμπερτ Χουκ (1635-1703)*. Οι άγκυρες διαφυγής, επέτρεπαν στους χρονοδείκτες να προχωρούν περιοδικά και ισόχρονα. Η διαφυγή, αποτελείτο από δύο μέρη, τη φάλαγγα και τον άξονα. Η φάλαγγα ήταν μια οριζόντια ισοζυγισμένη ράβδος με βαρύδια, που ταλαντευόταν εμπρός και πίσω, γεγονός που έδινε κανονικό ρυθμό στο ρολόι. Με τη ρυθμική της κίνηση η φάλαγγα κινούσε τον κατακόρυφο άξονα, που σε ορισμένα χρονικά διαστήματα σκάλωνε στον οδοντωτό κινητήριο τροχό του ρολογιού, έτσι ώστε να προχωρεί ο άξονας γρανάζι-γρανάζι στον τροχό. Το πολύπλοκο αυτό σύστημα χάρισε στα μηχανικά ρολόγια το ρυθμικό ήχο τικ-τακ.

Από το μηχανικό ρολόι στα ατομικά χρονόμετρα.

Κατά τον 19^ο αιώνα κατασκευάστηκαν εκπληκτικά αστρονομικά χρονόμετρα. Πρώτος ο *Ρόμπινσον*, διευθυντής του *Αστεροσκοπίου του Άρμαγκ* της Β. Ιρλανδίας, κατασκεύασε το *εκκρεμές βαρομετρικής αντιστάθμισης* (1831). Ο Σκωτσέζος *Αλέξανδρος Μπέν*, στον οποίο αποδίδεται και η πρώτη προσπάθεια κατασκευής τηλεμοιοτυπικής διάταξης, επινόησε το 1843 το ηλεκτρομαγνητικό εκκρεμές, χωρίς όμως πολύ καλά αποτελέσματα. Το 1889 ο *A. Ρίφλερ*, από το Μόναχο, δημιούργησε το «*σχεδόν ελεύθερο εκκρεμές*» σταθερής πίεσης, ενώ ο Γάλλος *Κάρλος Φερύ*, γύρω στο 1900, ανακαλύπτει τη βάση των σύγχρονων ηλεκτρικών ρολογιών, που η λειτουργία τους στηριζόταν στα λεγόμενα «*ασθενή ρεύματα*». Τα ηλεκτρικά αυτά χρονόμετρα παρουσίαζαν ακρίβεια της τάξης του 0,1 δευτερολέπτου την ημέρα. Το 1925 ανακαλύπτεται από τον *Σόρτ (W.H. Shortt)* το «*εκκρεμές ελευθέρων αιωρήσεων*», με ακρίβεια 10 δευτερολέπτων το έτος.

Η εποχή της λατρείας της ακριβούς μέτρησης του χρόνου είχε πλέον ανατείλει, μαζί με την ανατολή ενός νέου τεχνολογικού πολιτισμού. Η ώρα των *ατομικών χρονομέτρων* είχε φθάσει.

Η λειτουργία των ατομικών χρονομέτρων στηρίζεται σε μια απλή φυσική αρχή, την *ιδιοσυχνότητα* των ατόμων.

Τα άτομα και τα μόρια εκπέμπουν και απορροφούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε κάποιες σταθερές συχνότητες που εξαρτώνται από τη δομή τους. Η συχνότητα της ακτινοβολίας μετρείται σε Hertz. Τα ατομικά ρολόγια αποτελούνται κυρίως από δύο μέρη. Το σύστημα παραγωγής μιας πρότυπης σταθερής ατομικής συχνότητας, και την ηλεκτρονική διάταξη για τη μέτρηση των αντίστοιχων ταλαντώσεων.

Το πρώτο ατομικό ρολόι με ρυθμιστή παλλόμενο κρύσταλλο χαλαζία κατασκευάστηκε το 1928 από τον *Μάριζον (W.A. Marrison)* ο οποίος μετά από μια σειρά βελτιώσεων, πέτυχε τελικά το 1942 ακρίβεια 1/1000 του δευτερολέπτου την ημέρα.

Ακολούθησε η κατασκευή, το 1949, από το *National Bureau of Standards* στις ΗΠΑ, του *ατομικού ρολογιού αμμωνιάς* με ακρίβεια 1/100.000.000 του δευτερολέπτου την ημέρα, ενώ σήμερα τα σύγχρονα *ατομικά ρολόγια καισίου-133* (National Institute of Standards and Technology-NIST) παρουσιάζουν ακρίβεια της τάξης του ενός δισεκατομμυριοστού του δευτερολέπτου την ημέρα.

Οι έρευνες όμως συνεχίζονται πάνω σε σύγχρονες ηλεκτρονικές συσκευές γνωστές ως «*Ενεργά Πρότυπα*» ή *MASERs* (Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation).

Αυτοί οι αυτοσυντηρούμενοι ταλαντωτές, χρησιμοποιούν μια ατομική συχνότητα, για να δημιουργήσουν μια αντίστοιχη ραδιοσυχνότητα. Η ακρίβεια αυτών των ρολογιών είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερη των ατομικών ρολογιών καισίου.

Η τελική προσπάθεια των επιστημόνων στρέφεται στην κατασκευή του υδρογονικού ρολογιού που θα παρουσιάζει, θεωρητικά τουλάχιστον, την ασύλληπτη προσέγγιση της τάξεως των 1/1.000.000.000.000.000 δευτερολέπτων την ημέρα.

Σχετικότητα και ατομικά χρονόμετρα

Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας μας έδωσε τη δυνατότητα να συνειδητοποιήσουμε ότι ακόμα και ο χρόνος των ατομικών ρολογιών δεν είναι «απόλυτος» αλλά «σχετικός». Σύμφωνα με τη βαρυτική θεωρία του Αϊνστάιν, οι συχνότητες περιφοράς των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα των ιόντων δεν είναι σταθερές, αλλά μεταβάλλονται, μεταβαλλομένης της έντασης του βαρυτικού πεδίου μέσα στο οποίο βρίσκονται. Έτσι οι ηλεκτρονικές ταλαντώσεις των ιόντων ενός ατομικού ρολογιού θα παρουσιάζουν χαμηλότερο ρυθμό στον Ήλιο απ' ότι στη Γη. Παρόμοια φαινόμενα, μικρότερης έντασης, μπορούμε να παρατηρήσουμε σε διαφορετικούς τόπους επάνω στη Γη, οι οποίοι παρουσιάζουν διαφορετικές εντάσεις του γήινου βαρυτικού πεδίου.